V. Ueber die Aenderung des Farbentones von Spectralfarben und Pigmenten bei abnehmender Lichtstärke; von E. Albert.

(Hierzu Taf. II Fig. 3—17.)

In der Sammlung physiologischer Abhandlungen von Preyer, I. Reihe, 7. Heft, erschien unter dem Titel: „Ueber die Abhängigkeit der Farbenempfindung von der Lichtstärke“ eine Arbeit von Dr. A. Chodin, welche sich in ihrem ersten Theile mit demselben Thema beschäftigt. Chodin betont hierin die vollständige Analogie des Verhaltens von Pigmenten und Spectralfarben und kommt zu dem Schlusse, dass bei Abschwächung des Lichtes nicht Blau und Violett, sondern Gelb, Orange und Grün überwiegen; er bestätigt hiermit die Angaben Aubert's¹⁾, setzt sich dagegen in Widerspruch mit denen anderer.

So bemerkte Purkinje, dass Pigmente bei geringerer Beleuchtung farblos erscheinen, und dass Blau bei geringerer Helligkeit sichtbar wurde. Dove fand, dass Farben bei wechselnder Beleuchtungsstärke auch verschiedene Helligkeitsschwankungen erleiden. Die Beobachtung, dass das Blau bei geringerer Beleuchtung als das Roth sichtbar ist, machte er in einer Gemäldegallerie bei eintretender Abenddämmerung; dasselbe wurde in unabhängiger Weise von Grailich bemerkt.

Diesen Widerspruch sucht Chodin dahin zu erklären, dass die eben genannten Forscher nicht streng zwischen Lichteindruck und Farbeneindruck unterschieden.

Ich verweise wegen des Näheren auf die betreffende Abhandlung selbst.

Helmholtz machte Versuche mit Spectralfarben, welche den Angaben Chodin's direct entgegengesetzt sind. Der Versuch von Helmholtz²⁾ ist im wesentlichen folgender: In einem objectiven Spectrum werden durch einen Schirm mit zwei Spalten zwei Strahlengattungen isolirt, im betref-

1) Aubert, Physiologie der Netzhaut. p. 125.

2) Helmholtz, Phys. Optik. p. 317.

Ann. d. Phys. u. Chem. N. F. XVI.

fenden Falle waren dies Gelb und Violett. Das Violett erschien dem Auge natürlich dunkler als das Gelb; durch Erweiterung des dem Violett entsprechenden Spaltes konnte diese Helligkeitsdifferenz ausgeglichen werden. Wurde dann der Spalt vor dem Prisma, der die Lichtquelle für das erzeugte Spectrum war, verkleinert und somit die ganze Lichtmasse geschwächt, so machte sich diese Schwächung im Gelb stärker bemerkbar als im Violett.

Chodin wendet hiergegen ein, dass wir keine Mittel haben, die Helligkeit verschiedener Spectralfarben subjectiv gleich zu machen, da sie nach Qualität verschiedene Empfindungen geben. Ich kann den Einwand in dieser Form nicht für richtig erachten, obwohl dieselbe Ansicht auch von anderen vertreten wird. So sagt Siemens¹⁾: „Eine Vergleichung der durch unser Sehorgan hervorgerufenen Helligkeitsunterschiede ist unausführbar und ganz individuell. Ein richtiges Photometer sollte verschiedenartiges Licht dann als gleich angeben, wenn es uns in gleicher Weise entfernte Objecte erkennbar macht. Mit der Empfindung gleicher Helligkeit fällt diese Eigenschaft durchaus nicht zusammen. Betrachtet man eine Landschaft abwechselnd durch ein blaues und ein gelbes Glas, so erscheint sie im letzteren Falle viel heller, aber es ist darum, wenn das gelbe Glas viel Licht absorbirt, nicht ausgeschlossen, dass man durch das blaue Glas die Gegenstände viel deutlicher erkennt.

Das blaue Licht, welches in unser Auge gelangt, hat in diesem Falle für uns einen höheren Beleuchtungswerth, wenn es auch die geringere Helligkeitsempfindung hervorruft.“

Die Beobachtung an der Landschaft kann unter Umständen ganz richtig sein; dennoch glaube ich, lassen sich berechnete Einwände gegen den Satz erheben, dass gleiche Helligkeitsempfindung mit gleichem Beleuchtungswerth durchaus nicht zusammenfalle.

Ich will hier einen Versuch mittheilen, der Aufschluss über diese beiderseitigen Beziehungen gibt.

Eine Scheibe von weissem Carton wurde in der aus Fig. 3, 4 und 5 ersichtlichen Weise mit einem 1 mm breiten Schlitz

1) Siemens, Wied. Ann. 2. p. 547. 1877.

versehen; in einer Führung längs dieses Schlitzes lief ein Messingklotz mit Schraube, welcher durch eine Mutter in beliebiger Entfernung vom Mittelpunkte fixirt werden konnte. An dem Klötzchen war ein Metallstreifen von 1 mm Breite angelöthet, welcher durch den Schlitz der weissen Scheibe hervorragte und in der Weise umgebogen war, dass er die weisse Scheibe eben nicht berührte; längs des Schlitzes war dann auf den Carton ein Papierstreifen so aufgeklebt, dass von der Länge des Metallstreifens nur noch 1 mm sichtbar blieb. Der Metallstreifen wurde in einer Flamme mit Russ geschwärzt, und es war somit auf einer weissen Scheibe ein beweglicher, 1 qmm grosser schwarzer Index gegeben.

Wird diese Scheibe in Rotation versetzt, so mischt sich der schwarze Index mit um so weniger Weiss, je näher er dem Mittelpunkte des Kreises ist, und mit um so mehr, je näher er der Peripherie ist; die dadurch sich bildenden grauen Kreise werden im letzteren Falle immer schwächer werden und bei einer gewissen Entfernung vom Mittelpunkt ganz verschwinden. Es lässt sich nun z. B. im diffusen Tageslichte leicht diejenige Entfernung ausfindig machen, in welcher der graue Kreis eben noch erkannt werden kann. Führt man die rotirende Scheibe in diesem Zustande in einen Lichtkegel ein, der durch directes Sonnenlicht mittelst Heliostaten und eines Linsensystems erzeugt worden, so müsste, falls Fechner's psychophysisches Gesetz in allen seinen Consequenzen richtig wäre, der graue Ring sowohl in der grössten Nähe des Brennpunktes, wie in grösster Entfernung von demselben gleich deutlich erkennbar bleiben; die Abweichungen von eben genanntem Gesetze gestatten, die Strecke zu bezeichnen, innerhalb welcher der graue Ring auf der weissen Scheibe noch sichtbar ist. Man kann unter Umständen den Index noch weiter nach der Peripherie zu verschieben, ohne dass derselbe unsichtbar wird, die Strecke aber, innerhalb welcher er sichtbar ist, wird sich verkleinern; jedenfalls enthält der Lichtkegel auf irgend einem Punkte dieser Strecke diejenige Lichtmenge, welche das deutlichste Sehen ermöglicht, also im Sinne von Siemens den grössten Beleuchtungswerth hat.

(Ich bemerke, dass ich mittelst dieser Vorrichtung einen grauen Ring noch sehe, wenn der Unterschied der Helligkeit $\frac{1}{300}$ ist, während bei Helmholtz das höchste ein Unterschied von $\frac{1}{167}$ war.)

Da nun nach Helmholtz¹⁾ die Empfindungsstärke nicht proportional der objectiven Lichtstärke wächst, so tritt durch eine Vergrösserung dieser Intensität, welche ich als normale bezeichnen möchte, eine Verringerung der bestehenden Differenzen ein, in der Weise, dass die von der weissen Scheibe herrührende Helligkeitsempfindung sich hierbei bereits einem Maximum nähert, und deshalb die Stärke dieser Empfindung nicht in gleichem Maasse wächst, wie für den schwarzen Index. Das Umgekehrte findet statt bei einer Verringerung der Intensität.

Ist der graue Ring unsichtbar infolge zu starker Beleuchtung, so kann er ohne eine Ortsänderung der rotirenden Scheibe in dem Lichtkegel und bei gleichbleibender Entfernung des Index vom Mittelpunkt wieder sichtbar gemacht werden durch Einschaltung eines kleineren Diaphragmas in das Linsensystem oder eines Rauchglases in den Gang der Lichtstrahlen, oder indem man das Rauchglas vor das Auge hält und die rotirende Scheibe dadurch betrachtet.

Man wird nun wohl kaum dem Rauchglas einen grösseren Beleuchtungswerth zuschreiben wie einem farblosen, und doch verhält sich in unserem Falle das Rauchglas zu dem freien Auge wie das uns dunkel erscheinende blaue Glas zu dem hellen gelben bei der Betrachtung einer sonnenbeschienenen Landschaft. Es wird in derselben von manchen Gegenständen Licht in einer Stärke reflectirt werden, welche diejenige im Lichtkegel mit dem grössten Beleuchtungswerth bedeutend übertrifft. An solchen Gegenständen werden sofort mehr Details erkennbar, wenn eine Wolke die directe Sonnenbeleuchtung verhindert: es ist unschwer einzusehen, dass derselbe Erfolg leichter durch ein dunkles blaues, wie durch ein helles gelbes Glas erzielt wird.

Hierbei werden aber durch das blaue Glas einzelne

---

1) Helmholtz, Phys. Opt. p. 309—316.

Gegenstände nicht bloß deutlicher gesehen, wie durch das gelbe, sondern auch deutlicher wie mit freiem Auge. Es werden aber in der Landschaft auch Intensitäten vorkommen, die unter der normalen Lichtstärke sind. Selbstverständlich kann in diesem Falle durch ein farbiges Medium oder ein Rauchglas nicht mehr wahrgenommen werden wie mit freiem Auge.

Es fragt sich hier nur, ob durch das uns dunkler erscheinende blaue Glas mehr Einzelheiten wahrgenommen werden können wie durch das gelbe, z. B. bei den Helligkeitsunterschieden, die sie beide im Zustande der Sättigung haben. Dies muss entschieden verneint werden.

Was nun die Beziehungen zwischen gleicher Helligkeitsempfindung und gleichem Beleuchtungswerth bei verschiedenfarbigem Licht betrifft, so ist erstere als eine Annäherung an den letzteren zu betrachten.

Wenn durch zwei verschiedenfarbige Medien der graue Ring eben noch gesehen werden kann, so heisst dies doch nichts anderes, als dass beide physiologisch gleichwerthige Quantitäten Licht absorbiren und durchlassen, und insofern können sie, obwohl von verschiedener Qualität, dennoch sowohl unter sich, als auch mit einer entsprechenden Quantität weissen Lichtes in betreff ihrer Helligkeit als subjectiv gleichgeartet betrachtet werden. Nun verhält sich der gleiche Beleuchtungswerth zur gleichen Helligkeitsempfindung wie eine Messung zu einer Schätzung. Sind die Unterschiede recht gross, dann werden wir mit unserer Schätzung nicht im Zweifel sein, z. B. ein gesättigtes Blau wird uns unter allen Umständen dunkler erscheinen als ein gesättigtes Gelb. Auf Kosten der Sättigung kam das Blau so viel heller gemacht werden, dass es sich dem Gelb nähert; es wird auch ein Moment kommen, wo man beide für gleich hell hält, aber man kann dies nicht annähernd mit der gleichen Sicherheit behaupten, wie z. B. von zwei grauen Körpern.

Unser Urtheil wird hierbei auch Täuschungen unterliegen, indem wir gewiss geneigt sind, die Farbe, die im gesättigten Zustande die dunklere ist, nachher bei gleichem Beleuchtungswerthe für die hellere zu halten.

Trotz dieser Unsicherheit, die wir bei der Vergleichung verschiedener Qualitäten an den Tag legen, besitzen doch die Farben, die wir für gleich hell schätzen, unter allen Umständen eher einen gleichen Beleuchtungswerth, als solche, denen wir starke Helligkeitsdifferenzen zuerkennen, sodass man also nicht mit Siemens behaupten kann, „gleiche Helligkeitsempfindung fiele durchaus nicht mit gleichem Beleuchtungswerthe zusammen.“

Ein Ausgleich der Helligkeit, wie er von Helmholtz vorgenommen wurde, war also nicht bloß berechtigt, sondern er bot die einzige Möglichkeit, das Verhalten der verschiedenen Partien des Spectrums angehörigen homogenen Farben bei Lichtabschwächung zu erkennen.

Es ist eine vollkommene Verkennung der bestehenden Beziehungen, wenn Chodin nach seinen Einwürfen gegen den Versuch von Helmholtz zu dem Schlusse kommt, wir müssten uns mit jenen reinen, isolirten und gesättigten Farben begnügen, welche wir im Spectrum haben, und solche Farben verhielten sich bei Verringerung der Lichtintensität wie Pigmentfarben, bei welchen Gelb, Orange und Grün bei Abschwächung des Lichtes überwiegen. Der Versuch Helmholtz kann ganz gut neben den von Chodin beobachteten Veränderungen des Spectrums bestehen; auf keinen Fall dürfen diese mit den Veränderungen der Pigmentfarben in einen solchen Zusammenhang gebracht werden, wie dies von Chodin geschehen ist.

Um diese Behauptung zu beweisen, ist es nöthig, die Veränderungen der Spectralfarben zu besprechen.

Schon vor Chodin hat v. Bezold¹⁾ über diesen Gegenstand Untersuchungen angestellt, allerdings zu anderen Zwecken. Die Beobachtungen wurden an einem objectiven Spectrum angestellt, die Helligkeitsänderungen durch Diaphragmen hervorgerufen.

v. Bezold²⁾ kam zu dem Resultate, dass bei Verminderung des Lichtes die rothen Töne immer weiter gegen die Mitte des Spectrums zuschreiten. Die Umgebung von *D*

---

1) v. Bezold, Pogg. Ann. **150**. p. 238. 1873.

2) l. c.

zeigt die Farbe der Mennige, Gelb verschwindet ganz, und erst ein wenig vor der Mitte zwischen *D* und *E* beginnt das Grüne und erstreckt sich noch etwas über *F* hinaus, wo es ohne jede weitere Vermittelung an Violett grenzt.

Man hat nur drei Farben, Roth, Violett und Grün vor sich, hierbei ist das violette Ende noch nicht merklich verkürzt, wohl aber das rothe, welches jedoch gegen die brechbarere Seite verschoben erscheint.

Vermindert man die Helligkeit noch mehr, so wird zuerst das Violett gänzlich unsichtbar, das Roth erscheint Braunroth, das Grün blasst ab. Allmählich wird auch das Braunroth unsichtbar, und nur der mittlere Theil bleibt noch in blassgrünem Tone sichtbar. Zuletzt verschwindet auch hier die Farbenempfindung, ohne dass deshalb die Lichtempfindung aufhört, man kann sogar die Fraunhofer'schen Linien auf matt weisslichem Grunde erblicken.

v. Bezold erblickte darin, dass Roth, Grün und Violett eine so hervorragende Rolle bei diesen Untersuchungen spielen, einen Stützpunkt der Young-Helmholtz'schen Theorie dreier physiologischer Grundfarben.

Gegen diese Beobachtungen liesse sich nur einwenden, dass dieselben nicht mit isolirten Partien, sondern bei vollem Spectrum gemacht wurden, wobei Täuschungen durch Contrasterscheinungen nicht ausgeschlossen sind.

Chodin hat bei seinen Untersuchungen diesen möglichen Misstand beseitigt, indem er die einzelnen Farben durch einen metallenen Schieber mit verticalen Spalten, welcher hinter das Ocular seines Spectroskops eingeschaltet wurde, isoliren konnte. Die Beobachtung geschah in subjectiver Weise, die Verdunkelung wurde durch ein System von zehn Rauchgläsern erzielt, welche successive ausgeschaltet werden konnten. Die Methode mit Rauchgläsern ist entschieden nicht einwurfsfrei.

Seine beobachteten Veränderungen weichen in einzelnen Punkten von den v. Bezold'schen ab. Chodin sagt selbst hierüber: „Eine Differenz besteht darin, dass nach v. Bezold Violett sich lange nicht so verschmälert, und auch Roth

nicht, welches sich nach ihm nur nach dem Centrum verschiebt.“ Für das Roth kann ich eine in Betracht kommende Differenz nach Vergleichung der beiderseitigen Originalangaben nicht finden. Ferner ist bei v. Bezold die letzte sichtbare Farbe Grün, bei Chodin ein Gelblichröthlich und dunkles Rothorange. Chodin führt diese Abweichung darauf zurück, dass v. Bezold seine Untersuchungen nicht mit isolirten Farben gemacht hat; ich glaube, dass die verschiedene Methode der Verdunkelung einen grösseren Antheil daran hat; ich werde später darauf zurückkommen.

Ich habe diese Untersuchungen wiederholt, und zwar an einem durch directes Sonnenlicht mittelst Heliostaten erzeugten objectiven Spectrum. An einem Schlitten war ein Schirm mit verticalem Spalte angebracht, der Spalt war in der Mitte durch einen horizontalen Streifen unterbrochen; dadurch wurde die jeweilig zu untersuchende isolirte Farbe durch einen schwarzen Balken in zwei Theile getrennt. Die Verdunkelungsstufen wurden für die untere Hälfte durch einen zwischen Spalt und Spectrum eingeschalteten Epistotister erreicht.

Das gleichzeitige Erblicken der unveränderten Farbe und der verdunkelten erleichterte das Erkennen, in welchem Sinne sich letztere verändere, während das sie trennende schwarze Band eine Einwirkung der gesättigten Farbe auf die verdunkelte verhinderte.

Die von mir beobachteten Veränderungen stimmen im wesentlichen mit den von Chodin angegebenen überein, nur ist für mich das rothe Ende schon bedeutend verkürzt, wenn das violette noch in seiner ganzen Ausdehnung sichtbar ist.

Trotz der Gleichheit der Beobachtung komme ich zu wesentlich anderen Folgerungen wie Chodin. Nach demselben ordnen sich bei Verminderung des Lichtes die Spectralfarben nach ihrer Helligkeit fast in dieselbe Reihe, wie die ist, in der sie im Spectrum nach ihrer sozusagen farbigen Helligkeit erscheinen.

Hierunter versteht Chodin die Helligkeit der ge-

sättigten Spectralfarben, wie sie von Fraunhofer¹⁾ und Vierordt²⁾ bestimmt wurde.

Die von denselben bei directem Sonnenlichte erhaltenen Werthe sind:

	Fraunhofer	Vierordt		Fraunhofer	Vierordt
Roth <i>B</i> . . .	32	22	Grün <i>E</i> . . .	480	370
Orange <i>C</i> . .	94	128	Blaugrün <i>F</i> . .	170	128
Röthlichgelb <i>D</i>	640	780	Blau <i>G</i> . . .	31	8
Gelb <i>D—E</i> . .	1000	1000	Violett <i>H</i> . . .	5,6	0,7

Ist nun die Empfindungsstärke für verschiedenfarbiges Licht keine verschiedene Function der Lichtstärke³⁾, so muss das Maximum der Helligkeit bei Vergrösserung oder Verringerung der Intensität stets am gleichen Orte bleiben. Nach der Annahme Chodin's dagegen, dass für Spectralfarben und Pigmente bei Abschwächung des Lichtes Roth, Gelb und Grün überwiegen, müsste dieses Maximum sich mehr nach der weniger brechbaren Seite des Spectrums verschieben. Wenn dagegen die Farben der brechbareren Hälfte bei Herabsetzung der Intensität in geringerem Maasse geschwächt werden, so muss sich dies äussern in einer Verschiebung des Helligkeitsmaximums nach der violetten Seite hin. Dafür dass dies wirklich der Fall ist, finden sich in den Angaben Chodin's selbst die trefflichsten Belege.

Liess Chodin das zerstreute Tageslicht, das sein Spectrum erzeugte, durch zehn Rauchgläser gehen, so ergab sich eine solche Verdunkelung, dass keine Farbe mehr unterschieden werden konnte, aber ein Theil des Spectrums erzeugte noch einen Lichteindruck, nämlich die Strecke zwischen der Linie *D* einerseits und fast der Mitte des Raumes *F* und *G* andererseits. Dieser Abschnitt erschien grau, dunkler an den Rändern, heller in der Mitte, die hellste Stelle lag an dem Orte der Linie *E*, welche jedoch selbst nicht mehr erkannt wurde.

Nach Vierordt hat aber *E*, wenn man die hellste

1) Fraunhofer, Denkschrift d. bayr. Acad. p. 193. 1815.

2) Vierordt, Anwendung der Spectralanalyse. Tüb. 1871. p. 51.

3) Helmholtz, Phys. Optik. p. 317.

Stelle zwischen *D* und *E* gleich 1000 setzt, nur eine Helligkeit von 370. *D* dagegen 780. *C* und *F* sind gleich hell, nämlich 128, und dennoch wird von den Strahlen zwischen *C* und *D*, die alle heller sind als *F*, keine Erregung mehr verursacht, während andererseits noch die eine Hälfte zwischen *F* und *G* wahrgenommen wird.

Wird die Verdunkelung etwas gemildert, so rückt das Helligkeitsmaximum etwas gegen seine normale Lage hin; so fand Chodin nach Ausschaltung eines Glases die hellste Stelle zwischen der Mitte von *DE* und *E*.

Aus dem eben Citirten lässt sich wohl kaum mit Chodin der Schluss ziehen, dass sich die lichtschwachen Spectralfarben nach ihrer Helligkeit fast in dieselbe Reihe ordnen wie die lichtstarken, eher dass es entschieden nicht der Fall ist.

Das erwähnte Hin- und Herwandern der grössten Helligkeit erfolgt aber ganz unzweideutig im Sinne der Helmholtz'schen Anschauung; da aus dem sonstigen Verhalten des dispersiven Spectrums keine weiteren Argumente für oder dagegen beigebracht werden können, solange die betreffenden Untersuchungen nicht quantitativ gemacht werden, so muss vorderhand diese Anschauung als die richtige betrachtet werden.

Ich glaube wenigstens kaum, dass jemand aus der gleichfalls von v. Bezold und mir beobachteten Thatsache, dass Roth und Grün im prismatischen Spectrum bei Verdunkelung länger sichtbar sind, als Blau und Violett, folgern wird, das rothe Licht überwiege bei Abschwächung des Lichtes. Es ist hier doch vor allem zu bedenken, dass gleich breiten Streifen im Spectrum nicht gleiche Zunahmen der Schwingungszahlen entsprechen.¹⁾ Wir haben also hier infolge der Concentration des weniger brechbaren Theiles mit den natürlichen Verhältnissen durchaus nicht entsprechenden Intensitäten zu thun.

Ein sehr instructives Beispiel bietet eine Lösung von

---

1) Ueber die Bedingungen, die ein rationelles Spectrum zu erfüllen hat, vergl. v. Bezold, Pogg. Ann. **30.** p. 224. 1833.

üpermangansaurem Kali. In verdünntem Zustande hat dieselbe ein charakteristisches Absorptionsspectrum, die bekannten 5 Balken zwischen *D* und *F*. Bei wachsender Concentration füllen sich die Zwischenräume aus, und es entsteht ein dunkles Band von *D* bis etwas über *F*. (Fig. 14). Der Farbenton ist das Complement des absorbirten Grün, nämlich Purpur. Wird die die Lösung durchdringende Lichtmasse vermindert, so geht dieser Purpurton in Blauviolett über, was doch deutlich zeigt, dass das Roth mehr geschwächt wird wie das Blau.

Betrachtet man aber während der Lichtverminderung das Spectrum der Kalilösung, so ist Roth zwischen *C* und *D* noch ganz gut sichtbar, wenn das Spectrum von *F* bis *H* schon verschwunden ist; hiernach müsste sich also Purpur durch Verdunkelung nach Roth ändern.

Man muss hier erwägen, dass die Strecke von *F* bis *H* dreimal so lang ist wie die von *A* bis *D*, und dass die Summe der Strahlen von *F* bis *H* eine bedeutende Erregung in unserem Sehorgan hervorrufen kann, wenn die Erregung durch die einzelnen homogenen Strahlen auch nur eine minimale ist.

Die genannten, im prismatischen Spectrum waltenden Verhältnisse gestatten also nicht, ohne weiteres von den Aenderungen der homogenen Farben auf die der Pigmente zu schliessen; ein anderes Moment ist übrigens viel schwerwiegender, und wenn Chodin die Analogie der Aenderungen von Spectralfarben und Pigmentfarben als etwas Selbstverständliches betont, so zeigt dies, dass er den bestehenden Causalnexus vollständig missverstanden hat.

Ein gelbes Pigment, z. B. pikrinsaures Natron, lässt Strahlen von *A* bis zur Mitte von *b* und *F* (Fig. 17) fast ungeschwächt hindurch. Die Wellenlänge des mittleren specifischen Eindrucks sei $\lambda = 578$; wenn nun der entsprechende homogene Strahl durch Verdunkelung röthlich wird, so ist das Gleiche daraus doch nicht für das Pigment zu schliessen; dessen Aenderung ergibt sich aus der Summe der Aenderungen der homogenen Strahlen, aus denen es besteht, und diese Summe ist gar nicht leicht zu schätzen;

den sichersten Aufschluss hierüber wird immer ein Versuch geben. Die von mir angestellten Versuche ergaben nun in manchen Fällen andere Aenderungen für Spectralfarben wie für Pigmentfarben. Bevor ich zur Beschreibung derselben übergehe, möchte ich die Erklärung besprechen, die Helmholtz für die von ihm gemachte Beobachtung, dass homogene Strahlen des violetten Endes durch Verdunkelung eine geringere Einbusse ihrer Helligkeit erleiden als solche des rothen Endes, gegeben hat.

Helmholtz¹⁾ erklärt dies Verhalten aus der Hypothese Th. Young's von dreierlei Nervenfasern, rothempfindenden, grünempfindenden und violett empfindenden, dadurch, dass er annimmt: in den violett empfindenden Nerven wachse die Empfindungsstärke bei steigender Intensität anfangs schneller, später langsamer als in den grünempfindenden und in diesen ebenso im Vergleich mit den rothempfindenden.

So ungezwungen diese Annahme die längere Erhaltung der brechbareren Farben bei Herabsetzung der Intensität erklären würde, so wenig lässt sie sich mit den beobachteten Tonänderungen der Spectralfarben vereinen, obwohl dieselben für die Young-Helmholtz'sche Theorie in ihrer Allgemeinheit sehr sprechen.

Irgend ein homogener Strahl zwischen *B* und *C* soll der rothen Grundfarbe entsprechen; derselbe wird die Empfindung der grössten Sättigung hervorrufen, wenn er die rothempfindenden Nervenfasern am meisten, die grün- und violett empfindenden am wenigsten erregt; dies wird bei einer ganz bestimmten Grösse der seitlichen Elongation seiner Schwingungen eintreten. Hiermit ist durchaus nicht gesagt, dass dies die grösstmögliche Erregung der Rothfasern involvire. Ob nun dieses Maximum sehr nahe an der gesättigten Farbe gelegen oder sehr weit davon entfernt ist, jedenfalls wird durch eine Vergrösserung der Amplitude des gesättigten homogenen Strahles und damit verstärkter Empfindung die Erregung der Rothfasern sich bereits näher diesem Maximum befinden wie die erst beginnende Erregung der Grünfasern;

---

1) Helmholtz, Phys. Optik p. 320.

hieraus resultirt ein ungleiches Wachsen der beiden Empfindungen zu Gunsten des Grün; das ursprüngliche Roth müsste sich also nach Gelb hin verändern.

Das Experiment bestätigt dies auch: Homogenes Roth wird durch Vergrösserung seiner Intensität zuerst Orange und bei grossen Intensitäten Gelb. Dass ein solches Gelb durch Abschwächung der Intensität wieder Roth wird, bedarf wohl keiner Ausführung.

Nach den Curven, die Helmholtz über die Erregung der drei Grundempfindungen durch die Spectralfarben gibt, wird es einen Strahl kleinerer Wellenlänge wie den erwähnten rothen geben, der vermöge seiner physikalischen Individualität die Roth- und Grünfasern auch bei einer mässigen Intensität in gleicher Stärke erregt und eine Gelbempfindung verursacht; diese Stelle im Spectrum ist auf der brechbareren Seite von *D*. Für ein solches Gelb ist nun gar kein Grund einer Tonänderung vorhanden. Wird die Intensität vergrössert, so wird die Erregung der Roth- und Grünfasern in gleichem Maasse stärker werden, und durch vermehrte Erregung der Violettfasern kann nicht der Ton geändert, sondern nur die Sättigung vermindert werden; wird die Intensität dagegen verringert, so ist auch nicht abzusehen, warum dadurch der Ton geändert werden sollte, er müsste dadurch eigentlich nur lichtschwächer werden.

Nun wird aber dies Spectralgelb durch Verdunkelung sehr entschieden röthlich, und sogar Grüngelb bis zur Mitte von *DE* und *D* erscheint als röthliches Grau. Nach der Annahme von Helmholtz sollten aber die Grünfasern bei einer geringeren Lichtstärke relativ stärker erregt werden als die Rothfasern, das homogene Gelb müsste danach entschieden grün werden.

Analog dem Spectralgelb ist das Cyanblau bei *F*. Wie das Gelb durch Verdunkelung röthlich wurde, so wird dieses Grünblau grün, und zwar erstreckt sich dies Grün eine gute Strecke hinter *F*, woselbst es ohne jeden Uebergang an Violett stösst; bei Erhöhung der Intensität wird das Grünblau weisslich Blau.

Wenn nun nach Helmholtz in den violetteempfindenden

Nerven bei steigender Intensität die Empfindungsstärke anfangs schneller, später langsamer wächst als in den grünempfindenden, so müsste doch gerade das Umgekehrte eintreten: durch Vergrößerung der Intensität müsste das Cyanblau grün werden, durch Verminderung blau.

Hiernach lässt sich die Annahme Helmholtz's mit den Tonänderungen gewisser Spectralfarbengruppen, deren Beobachtung allerdings späteren Datums ist, nicht vereinbaren.

Ich glaube nun, dass sich sowohl die längere Erhaltung der brechbareren Farben wie die sämtlichen Tonänderungen der Pigmentfarben und der Spectralfarben unter einen einheitlichen Gesichtspunkt bringen lassen, durch die Annahme: „dass Strahlen kleinerer Wellenlänge, welchem Theile des Spectrums sie auch angehören, bei einer geringeren Amplitude unseren Sehorganismus zu erregen im Stande sind, als solche grösserer Wellenlänge.“

Fig. 11 gibt in schematischer Weise die graphische Darstellung dieser Annahme. Die ausgezogenen Curven sind die Erregungscurven wie sie Helmholtz für die drei Nervenfasernarten gibt. Für jeden Punkt der aufsteigenden Hälfte einer solchen Curve gibt es einen gleichwerthigen auf der abfallenden Seite.

Ein Strahl bei F soll in gleicher Stärke auf die Grün- und Violettfasern wirken, im Violett muss es dann irgendwo einen homogenen Strahl geben, der auf die Violettfasern mit der gleichen Stärke wirkt wie der Strahl bei F . In der Figur sind diese gleichen Empfindungsstärken entsprechenden Punkte auf der Curve durch eine gestrichelte gerade Linie NN verbunden.

Wird nun das Licht soviel abgeschwächt, dass die Curve für den homogenen violetten Strahl nach v' sinkt, so muss nach der gemachten Annahme die Curve für den Strahl grösserer Wellenlänge bei F bei der gleichen Abschwächung schon tiefer nach v'' gesunken sein. Dadurch nimmt die Curve für die Violetttempfindung für geringe Intensitäten eine Form an, wie sie die gestrichelt gezeichnete Curve zeigt.

Der Strahl bei F erregte in gleicher Stärke wie die Violettfasern auch die Grünfasern, während er aber den

Violettfasern gegenüber ein Strahl grosser Wellenlänge ist, erscheint er den Grünfasern gegenüber als ein Strahl kleiner Wellenlänge, die Empfindungscurve für die Grünfasern wird also nicht im gleichen Maasse sinken wie für die Violettfasern.

Hiernach müsste sich im Spectrum bei Abschwächung des Lichtes das Grün nach der violetten Seite hin ausbreiten, bei Verstärkung dagegen das Violett gegen den Mittelpunkt des Spectrums vorrücken.

Dies entspricht vollkommen den Thatsachen: die Gegend bei *F* im Spectrum erscheint bei geringer Intensität grün, bei mittlerer grünlichblau (Cyanblau), bei grosser weissblau.

Ganz dieselben Verhältnisse finden sich im Gelb wieder; ein homogener gelber Strahl ist für die Rothfasern ein Strahl kleinerer Wellenlänge wie für die Grünfasern, die Empfindungscurve wird also für die Grünfasern schneller sinken wie für die Rothfasern. Homogenes Gelb muss hiernach bei Verminderung der Intensität röthlich werden; die Beobachtung bestätigt dies auch.

Dagegen wird ein Gelb, das optisch aus homogenem Roth und homogenem Grün gemischt ist, durch Verdunkelung grün; indem der grüne Strahl die kleinere Wellenlänge besitzt. Das Gleiche geschieht, und zwar in sehr deutlicher Weise bei gelben Pigmenten. Bei denselben muss die Gelbempfindung hauptsächlich erzeugt gedacht werden aus der Zusammenwirkung einer gewissen Anzahl homogener rother, rothgelber, grüner, gelbgrüner etc. Strahlen.

Wenn man das Spectrum des schon erwähnten pikrinsauren Natrons, eines der besten Repräsentanten gelber Pigmente, betrachtet, so ersieht man sofort, dass das eigentliche Spectralgelb vermöge seiner geringen Breite nur eine unbedeutende Rolle bei Pigmentgelben spielen kann. Ein Rothwerden dieses im Pigment enthaltenen homogenen Gelb bei einer gewissen Verdunkelung wird sogleich wieder für die Gesamttempfindung ausgeglichen, auch die Verkürzung, die das rothe Ende gleichzeitig erleidet.

Wenn Chodin angibt, Pigmentgelb erhalte durch Verdunkelung einen röthlichgelblichen Ton, so hat er eben seine

Untersuchungen unter Umständen angestellt, welche eine richtige Erkennung der Aenderung verhinderten.

Die von mir gemachte Annahme würde auch die Aenderung des spectralen Blau nach Violett erklären, ohne dass es nöthig wäre, Violett als Grundfarbe zu wählen.

Bei Maxwell, der Blau als dritte Grundfarbe annimmt, hat die Curve der Rothempfindung zwei Maxima, einmal zwischen *B* und *C* und dann zwischen *G* und *H*. Ein Violettwerden des Blau würde sich dann dadurch erklären, dass die Erregung der Rothfasern durch die blauen Strahlen kleiner Wellenlänge langsamer abnimmt, wie die der Blaufasern.

Der Umstand, dass das äusserste Violett bei *H* durch Verstärkung der Intensität sich etwas dem Purpur nähert, würde direct für eine doppelte Erhebung der rothen Empfindungscurve sprechen. Dieser Rosaton lässt sich sonst nicht erklären; das Violett müsste im Gegentheile blau werden, ebenso wie das Roth bei grosser Lichtstärke gelb wird, auch die mit steigender Intensität verbundene Verstärkung der blaugrünen Fluorescenz könnte blos in demselben Sinne wirken.

Aus dem Vorhergehenden wird klar geworden sein, dass eine Analogie der Aenderung des Tones von Spectralfarben und Pigmentfarben bei Verringerung ihrer Helligkeit nicht nöthig ist, dass sich in gewissen Fällen sogar sehr auffallende Unterschiede zeigen müssen.

Ich habe nun eine Reihe von Untersuchungen über die Tonänderungen von Pigmenten nach verschiedenen Methoden ausgeführt, welche alle zu den gleichen Resultaten führten. Ich werde diejenige Methode näher beschreiben, bei welcher sich mir die deutlichsten Aenderungen ergaben.

Als Objecte wurden theils durchsichtige farbige Lösungen, theils die Helmholtz'schen Seidenpapiere verwendet. Die ersteren kamen in die Cüvetten *abc* und *a'b'c'* (Fig. 6). Dieselben waren in der aus der Figur ersichtlichen Weise durch Schnüre miteinander verbunden, welche über zwei Rollen *R* und *R'* liefen. Durch Drehung an einer Rolle bei *R'* konnten beliebig dicke Schichten hergestellt werden, das ganze

System blieb bei jeder Schichtendicke parallel. LM ist eine niedere Metallschiene, längs deren die Cüvetten gleiten. Ueber das Cüvettenpaar wurde das Gehäuse $ABCD$ gestürzt. Fig. 7 gibt davon den Aufriss längs des Schnittes ef , Fig. 9 die perspectivische Ansicht in verkleinertem Maassstabe. Das Gehäuse war innen geschwärzt; in der einen Wand befand sich der Ausschnitt $EE'FF'$, (Fig. 9), in welchen die auf beiden Seiten mit schwarzem Sammt überzogene Schablone ss (Fig. 10) mit den beiden Oeffnungen o und o' eingeführt werden konnte.

War der Standpunkt des Auges (Fig. 6) O einmal fixirt, so ergab sich die Grösse des auf der Rückseite des Gehäuses nöthigen Ausschnittes GH von selbst. Das die Cüvetten durchdringende Licht rührte von dem unter 45° geneigten Carton bei K her, die Verdunkelung wurde hergestellt durch Aubert's Episkotister, der ebenfalls mit schwarzem Sammt überzogen war, und der bei E (Fig. 6) so weit vorgeschoben wurde, dass das durch die rechte Oeffnung o' der Schablone in das Auge gelangende Licht verdunkelt wurde. Die in den Tabellen in horizontaler Reihe stehenden Zahlen drücken direct die den Episkotister passirenden Lichtmengen aus.

Die Cüvetten waren 14 cm lang und 3,3 cm breit, sodass jede Verschiebung derselben um 1 mm ein Schichtenwachsthum von 0,48 cm zur Folge hat. Die Verschiebung wurde in folgender Weise bestimmt: Die Wand ab (Fig. 6 und Fig. 8) der einen dem Auge zunächst liegenden Cüvette war am oberen Rande mit einem durchsichtigen, in Millimeter getheilten Maassstabe versehen; dicht hinter der Cüvettenwand war durch die Decke des Gehäuses eine Nadel N getrieben (Fig. 7 und 9). Da das Gehäuse feststehend war, konnte die Verschiebung an der Scala abgelesen werden.

Ausserdem suchte ich die Beleuchtungswerthe der verschiedenfarbigen diaphanen Medien für verschiedene Schichtendicken zu ermitteln.

Als Mittel zur Bestimmung des Beleuchtungswerthes bediente ich mich der Burkhardt'schen internationalen Sehproben, und zwar der Tabellen I, II, III, IV.

Diese Tabellen sind bestimmt zur Messung der Seh-

schärfe und in der Weise angeordnet, dass verschiedengrosse schwarze Tüpfel auf weissem Grunde zu drei bis sieben in wechselnden Formen combinirt sind (hierbei ist stets der Durchmesser der kreisförmigen Tüpfel gleich dem gegenseitigen Minimalabstande) und in bestimmten Entfernungen noch deutlich gezählt werden müssen.

In welcher Weise die Tüpfel wachsen, wird aus Tabelle IV ersichtlich sein.

Tabelle IV.

Minimalabstand der Tüpfel in mm	Maximalentfernung, in der ein normales Auge die Tüpfel zählt	Minimalabstand der Tüpfel in mm	Maximalentfernung, in der ein normales Auge die Tüpfel zählt
$\frac{3}{32}$	15 cm	$\frac{1}{5}$	32 cm
$\frac{1}{10}$	16 "	$\frac{9}{40}$	36 "
$\frac{9}{80}$	18 "	$\frac{1}{4}$	40 "
$\frac{1}{8}$	20 "	$\frac{9}{32}$	45 "
$\frac{9}{64}$	22 $\frac{1}{2}$ "	$\frac{5}{16}$	50 "
$\frac{5}{32}$	25 "	$\frac{11}{32}$	55 "
$\frac{11}{64}$	27 $\frac{1}{2}$ "	$\frac{3}{8}$	60 "
$\frac{3}{16}$	30 "	$\frac{7}{16}$	70 "

Für mein Auge, das eine etwas mehr als normale Sehstärke hat, ist nun die kleinste Sehprobe, deren Tüpfel einen Durchmesser von $\frac{3}{32}$ mm haben, bei günstigster Beleuchtung noch in einer Entfernung von 125 cm sichtbar, selbstverständlich nicht in der Weise, dass die Tüpfel gezählt werden können, sondern das betreffende Tüpfelconglomerat erscheint als eine graue Wolke; über 125 cm kann die Existenz dieser Sehprobe überhaupt nicht mehr erkannt werden; der gleiche Erfolg tritt ein bei Abschwächung des Lichtes. Es sind hier ganz ähnliche Verhältnisse, wie bei dem eben noch sichtbaren grauen Ring auf der rotirenden Scheibe. Dort war der Index in der Maximalentfernung vom Mittelpunkt, um sich mit möglichst viel Weiss zu mischen, hier sind die Sehproben in der Maximalentfernung vom Auge, und die Tüpfel schwinden infolge der Verkleinerung des Winkels, unter dem sie gesehen werden.

Die in den folgenden Tabellen unter Beleuchtungswerth stehenden Zahlen bedeuten also die betreffenden Sehproben, welche durch die farbigen Lösungen in einer Entfernung von

125 cm vom Auge, bei einer Adaption von 10 Secunden noch erkannt werden konnten.¹⁾

Bei diesen Bestimmungen ist vor allem darauf zu achten, dass von den Glaswänden der Cüvetten keine Reflexe vom Gesichte und dem im Hintergrunde befindlichen Gegenständen ins Auge gelangen; des weiteren darf kein seitliches Licht in das Auge gelangen, was am besten durch Tragen einer eigens hierzu construirten Brille vermieden wird. Eine Hauptbedingung ist natürlich, dass die Lösung vollkommen klar ist, und dass das zu den Cüvetten verwendete Glas nicht verzeichnet; nach jeder Bestimmung muss das Auge wieder gehörig ausruhen.

Trotz aller angewandten Vorsichtsmaassregeln können die mitgetheilten Zahlen keinen Anspruch auf grosse Genauigkeit machen; namentlich sollen sie nicht als photometrische Bestimmungen gelten. Dennoch glaube ich, bieten sie so werthvolle Anhaltspunkte, dass ihre Mittheilung gerechtfertigt erscheint. In der ersten Tabelle z. B., die Veränderungen des schwefelsauren Kupferoxydammoniaks betreffend, heisst es, dass diese Lösung bei einer Schichtendicke von 2,36 cm rein blau erscheint, und dass durch die Lösung die Sehprobe 36 noch erkannt werden kann. Veränderlich hierbei ist blos die Schichtendicke, diese hängt ab von der Concentration der Lösung; ob dieselbe nun stark oder gering concentrirt ist, stets wird durch die Lösung in dem Momente, wo sie das reinste gesättigste Blau zeigt, die Sehprobe 36 eben noch erkannt werden.

Zur Erleichterung des Verständnisses sind ausserdem die Absorptionsspectra der untersuchten Lösungen bei drei verschiedenen Schichtendicken mitgetheilt. (Fig. 12 bis Fig. 17).

Ich habe in den Tabellen darauf verzichtet, durch Epitheta, wie schwarz, dunkel, hell, die Grade der Helligkeit der betreffenden Farben anzudeuten, indem ich glaube, dass jeder Leser dieselben selbst entnehmen kann aus den mit-

---

1) Ich möchte hier vorschlagen, diese Sehproben bei der Untersuchung Farbenblinder zu verwenden; z. B. ein Rothblinder, der helles Roth mit dunklem Grün verwechselt, muss durch ein rothes Ueberfangglas eine geringere Anzahl Sehproben erkennen als ein Normalsehender.

getheilten Beleuchtungswerthen und bei Verdunkelung, aus den in horizontaler Linie stehenden Zahlen, welche Bruchtheile der Lichtmenge sind, die den grössten Beleuchtungswerth besitzt.¹⁾

Um diese Lichtmenge zu erhalten, war der ganze Versuch in einer gegen Süden gelegenen Räumlichkeit aufgestellt, das Seitenlicht fiel durch ein Fenster von 12 qm, ebenso das Oberlicht. Durch verschiebbare weisse Vorhänge konnte das Licht innerhalb breiter Grenzen verstärkt und vermindert werden. Die Beobachtung geschah blos an wolkenlosen Tagen. Der grösste Beleuchtungswerth ist annähernd bestimmt durch die Maximalentfernung, in der die kleinste Sehprobe (15) eben noch erkannt werden kann; diese Entfernung ist für mich 125 cm. Ist die Beleuchtung zu grell oder zu gering, so kann die Sehprobe in dieser Entfernung nicht mehr wahrgenommen werden.

Zu bemerken ist noch, dass, wenn die Farben mittelst der Schablone *sw* (Fig. 10) auf schwarzem und weissem Grunde gesehen wurden, die Farbenempfindung bei grosser Verdunkelung stets zuerst auf schwarzem Grunde eintrat, und dass mit und ohne Verdunkelung die Farbe auf schwarzem Grunde den Eindruck machte, als ob sie mehr Roth enthalte wie auf weissem; besonders auffallend ist dies bei Violett und Blau.

Schwefelsaures Kupferoxydammoniak. (Spectrum Fig. 12).

Schichtendicke in cm	Beleuchtungswerth	Farbenton bei normalem Licht	Farbenton bei Lichtabschwächung				
			0,02	0,08	0,2	0,35	0,5
0,48	16	Grünliches Hellblau	Blau	Blau	Blau	Blau	Blau
0,96	20						
1,44	22						
1,92	30	Reinblau	Violett-blau	Violett-blau	Violett-blau	Violett-blau	Blau
2,36	36						
2,88	45						
3,64	80	Violettblau	Blau-violett	Blau-violett	Blau-violett	Violett-blau	Violett-blau
4,8	140						
5,76	225						

1) Hierbei ist das Licht vernachlässigt, welches von dem schwarzen Sammt des Episkotisters reflectirt wurde.

Die Aenderungen durch Verdunkelung beruhen hauptsächlich auf dem Violettwerden des spectralen Blau; der Einfluss der eigentlichen violetten Strahlen ist nicht sehr hoch anzuschlagen, indem dieselben an und für sich eine so geringe Intensität besitzen, dass sie bei Verdunkelung keinen beträchtlichen Eindruck auf unser Sehorgan machen werden. Die Richtigkeit dieser Behauptung lässt sich leicht prüfen an einer Lösung von Berlinerblau in Oxalsäure; dieselbe hat ein dem Kupferoxydammoniak sehr ähnliches Spectrum, nur ist das äussere Violett absorbtirt, und deshalb der Ton durchweg etwas grünlicher; dennoch fallen die Aenderungen ganz in demselben Sinne aus wie oben, nur etwas weniger prägnant sind sie, gewissermassen graulicher.

Bleu de Lyon. (Anilinblau).

Schichten- dicke in cm	Beleuchtungs- werth	Farbenton bei normalem Licht	Farbenton bei Lichtabschwächung				
			0,02	0,08	0,2	0,35	0,5
0,48	20	Grünlichblau	Blau	Blau	Blau	Blau	
0,96	30	Reinblau	Violett- blau	Violett- blau	Violett- blau	Violett- blau	Blau
1,44	45						
1,92	55	Violettblau	Blau- violett	Blau- violett	Violett- blau	Violett- blau	Violett- blau
2,88	80						
4,8	160						

Obwohl dieses Blau einen Streifen rothen Lichtes durchlässt (vgl. Spectrum Fig. 13), zeigt es doch dieselben Veränderungen wie das Kupferoxydammoniak. Bei der Betrachtung des Absorptionsspectrums könnte man eher vermuthen, dass dieses Blau durch Verdunkelung grünlich werde, infolge der stärkeren Schwächung des Roth; daraus, dass es in Wirklichkeit mehr violett wird, lässt sich jedoch noch gar nichts gegen diese stärkere Schwächung des Roth argumentiren, sondern man kann nur den Schluss ziehen, dass die Summe der Momente, welche eine Aenderung nach Violettbedingen, eine so grosse ist, dass die Momente von entgegen gesetzter Tendenz qualitativ gar nicht bemerkt werden.

Uebermangansauges Kali. (Spectrum Fig. 14).

Schichten- dicke in cm	Beleuchtungs- werth	Farbenton bei normalem Licht	Farbenton bei Lichtabschwächung				
			0,02	0,08	0,2	0,35	0,5
0,28	16	Purpur	Purpur- violett	Purpur- violett	Purpur- violett	Violett- purpur	Violett- purpur
0,48	18					Violett	Violett
0,96	20		Violett	Violett	Violett		
1,44	30					Purpurviolett	Blau- violett
1,92	36	Violett	Violett	Violett	Violett		
2,88	70					Purpurviolett	Blau- violett
3,64	160	Violett	Violett	Violett	Violett		
4,8	400					Violett	Violett
5,76	800	Violett	Violett	Violett	Violett		

Uebermangansauges Kali ist für ungleich grössere Mengen rothen Lichtes durchsichtig als das Bleu de Lyon. Eine stärkere Schwächung des Roth muss sich daher sehr bestimmt bemerkbar machen durch eine Aenderung des Purpurtones nach Violett; es macht sich dies schon geltend bei Schichtenwachsthum ohne Verdunkelung. Das Roth wird hierbei in seiner Ausdehnung nur wenig geschmälert, aber die Intensität der durchgelassenen Strahlen verringert sich in hohem Grade. Dass die Ursache hierfür nicht in einer physikalischen Eigenthümlichkeit des übermangansaugen Kali zu suchen, sondern allgemein physiologischer Natur ist, geht wohl daraus hervor, dass das Violett bei einer Schichtendicke von 5,74 cm durch eine Steigerung des die Cüvetten durchdringenden Lichtes wieder in Purpur verwandelt wird.

Anilinviolett. (Spectrum Fig. 15).

Schichten- dicke in cm	Beleuchtungs- werth	Farbenton bei normalem Licht	Farbenton bei Lichtabschwächung				
			0,02	0,08	0,2	0,35	0,5
0,24	16	Lila	Blau- violett	Blau- violett	Blau- violett	Blau- violett	Blau- violett
0,48	18	Blauviolett					
1,44	27 ¹ / ₂						
2,40	32	Violett					
3,36	40						
4,32	45						
5,28	50						
6,24							

Der Farbenton muss in dünnsten Schichten als Blau bezeichnet werden, indem die erste Andeutung der Absorption im Gelb erfolgt; durch das rasche Wachsen derselben nach dem brechbaren Ende des Spectrums ändert sich der Ton nach Violett. Wie aus den Burkhardt'schen Zahlen ersichtlich ist, ist diese Lösung viel weniger concentrirt wie die des übermangansauren Kalis, infolge dessen gehen die rothen Strahlen auch in dicken Schichten beinahe ungeschwächt hindurch; wird die Lösung dagegen concentrirter gehalten, so geht das Violett durch Schichtenwachsthum wieder in Blauviolett über, dasselbe geschieht durch Verdunkelung.

Aus den bisher mitgetheilten Veränderungen ergibt sich, dass Farben, welche für das violette Ende des Spectrums allein oder für beide Enden zugleich durchlässig sind, durch Verdunkelung in gemeinsamer Weise nach Blauviolett gravitiren.

Es ist interessant, wie sich ein Blauviolett selbst bei Lichtabschwächung verhält. Aus dem Bleu de Lyon und dem Anilinviolett lässt sich leicht ein Blauviolett mischen, dasselbe zeigt dann bei einer bestimmten Verdunkelungsstufe durchaus keine Aenderung des Tones; in diesem Falle wird die Summe der Veränderungen, welche den mittleren specifischen Eindruck der durchgelassenen brechbaren Strahlen von Blau nach Violett hindrängen würden, eine physiologisch äquivalente Verringerung der durchgelassenen rothen Strahlen entgegengesetzt.

Bei dem Bleu de Lyon ist der durchgelassene Streifen im Roth so schmal, dass die stärkere Schwächung dieses Roth die Aenderungen am entgegengesetzten Ende nicht ausgleichen kann, bei dem Anilinviolett und übermangansaurem Kali so breit, dass sie dadurch sogar überboten werden.

Die hier beschriebenen Tonänderungen des Blau, Violett und Purpur sind sehr prägnant und werden leicht vom ungebühtesten Auge erkannt. Für grüne Farben gestalten sich die Verhältnisse anders, bei denselben können entweder gar keine Veränderungen constatirt werden oder nur geringfügige.

Der Grund hierfür ist unschwer einzusehen. Erstens werden die Veränderungen der Farbstoffe dann am drastischsten sein, wenn die Farbstoffe aus Strahlen sehr differenter Wellenlänge bestehen, dies ist für Purpur und Violett mehr der Fall wie für Grün; dann müssen auch noch die Aenderungen in Betracht gezogen werden, welche die homogenen Strahlen selbst erleiden.

Zum Beispiel salpetersaures Nickel liefert Strahlen von *D* bis nach *F* (Fig. 16). Nun wird aber homogenes Gelbgrün durch Verdunkelung grün, homogenes Grün bleibt unverändert, Blaugrün wird bis über *F* hinaus ebenfalls Grün; es sind also gar keine Ursachen zu einer Tonänderung des Farbstoffes vorhanden.

Es beschränkt sich dies nicht bloß auf das salpetersaure Nickel, sondern man kann allgemein sagen: jeder grüne Farbstoff, der annähernd der Grundfarbe entspricht, erleidet durch Verdunkelung keine Aenderung seines Tones. Dagegen nähern sich grünblaue Farbstoffe dem Blau, gelbgrüne dem Grün. Ein grünliches Blau, das *F* entsprechen würde, wird blau. Ein solcher Farbstoff besteht eben aus Strahlen von *E* bis *G*; wenn auch die homogenen blaugrünen Strahlen alle mehr grün werden, so wird dies sofort aufgehoben durch das Violettwerden der durchgelassenen blauen Strahlen; da dieselben aber als Strahlen kleinerer Wellenlänge durch Verdunkelung weniger geschwächt werden, wie die grünen Strahlen, so resultirt eine Verschiebung des ursprünglich grünlich-blauen Tones nach reinem Blau, während der betreffende homogene Strahl grün wird. Eine noch auffallendere Verschiedenheit der Tonänderung von Pigmentfarben und Spectralfarben durch Verdunkelung zeigt das Gelb. Da gelbe Lösungen so hell sind, dass eine Bestimmung des Beleuchtungswerthes mittelst der Burkhart'schen Tabellen nicht leicht ausführbar gewesen wäre, so gelten die folgenden Schichtendicken für eine concentrirte Lösung von pikrinsaurem Natron.

Pikrinsaures Natron. (Spectrum Fig. 17).

Schichten- dicke in cm	Farbenton bei normalem Licht	Farbenton bei Lichtabschwächung.				
		0,02	0,08	0,2	0,35	0,5
0,48	Grünlichgelb	Grüngelb	Grüngelb	Grüngelb	Grüngelb	Grüngelb
1,44						
2,40						
3,36	Gelb	Gelb	Gelb	Gelb	Gelb	Gelb
3,84						
4,32						
4,80	Röthlichgelb	Rothgelb	Rothgelb	Rothgelb	Rothgelb	Rothgelb
5,28						
6,24						

Das reinste gesättigte Gelb ist für mich bei einer Schichtendicke von 4,32 cm; dies Gelb wird durch Lichtabschwächung grünlich, doch ist diese Aenderung deutlicher bei mittlerer Verdunkelung als bei sehr grosser. Röthliches Gelb wird bei mittlerer Verdunkelung gelb, bei starker roth. Es erklärt sich dies daraus, dass das Spectrum schon bei geringer Lichtabschwächung an seinem rothen Ende verkürzt wird, die röthlichen Töne in Gelb aber erst später auftreten, dann daraus, dass die orangenen und orangegelben homogenen Strahlen mehr roth werden als die gelbgrünen grün (es ergibt sich dies auch aus den Curven Fig. 11). Bei sehr grosser Verdunkelung ist dann das + von Roth so bedeutend, dass es durch die längere Erhaltung der kleinwelligen grünen Strahlen nicht mehr ausgeglichen werden kann.

Aus denselben Gründen werden Orangefarbstoffe durch Verdunkelung roth; diese Aenderung wird um so geringfügiger sein, je mehr sich der Farbstoff (im Zustande der Sättigung) in seinem Tone der Grundfarbe nähert.

Diese an durchsichtigen farbigen Medien beobachteten Tonänderungen bei Verdunkelung gelten auch für die Pigmente im engeren Sinne; sie sind bei diesen wegen des unvermeidlichen diffusen Lichtes und der damit verbundenen Verringerung der Sättigung etwas weniger deutlich, jedoch unmöglich zu übersehen. Ich überzeugte mich davon an den Helmholtz'schen Seidenpapieren. Der Versuch wurde einfach so ausgeführt, dass die beiden Cüvetten entfernt wurden,

und an Stelle des weissen Cartons bei *K* (Fig. 6) die Bogen farbigen Papiere kamen. Da die Aenderungen derselben sich in allen Fällen mit denen der gleichtonigen farbigen Medien decken, so ist deren Mittheilung überflüssig; hervorheben möchte ich nur, dass auch Pigmentgelb¹⁾ durch Verdunkelung für mich in der entschiedensten Weise grünlich wird, was den Angaben Chodin's widerspricht, der eine Aenderung des Gelb nach Roth beobachtet hat.

Ich habe schon erwähnt, dass die Methode mit den Rauchgläsern, wie sie von Chodin angewandt wurde, nicht einwurfsfrei ist. Vor allem dürfen die Gläser nicht rein grau sein. Ein Rauchglas kann uns nämlich blos dann reingrau erscheinen, wenn es die Störung des Gleichgewichtes, welche die Empfindung aus physiologischen Gründen durch die stärkere Schwächung der weniger brechbaren Seite des Spectrums erfährt, wieder gut macht auf physikalischem Wege durch eine entsprechende Absorption der stärker brechbaren Seite. Physikalisch betrachtet ist also ein reingraues Rauchglas gelblichgrau, und die Anwendung eines solchen Glases zu vorliegenden Untersuchungen streng genommen nicht statthaft; es müsste eigentlich ein Grau mit bläulichem Anflug sein.

Uebrigens hat schon Vierordt²⁾ darauf aufmerksam gemacht, dass Rauchgläser die Spectralfarben nicht in gleichem Verhältniss abschwächen. Alle mir bekannten Rauchgläser lassen, in grösserer Anzahl combinirt, hauptsächlich rothes Licht durch, wenn auch die einzelnen Gläser ein neutrales Grau zeigen.

Chodin hat bei seinen Untersuchungen noch eine andere Methode angewandt, nämlich Verdunkelung des Beobachtungsraumes, und kam zu denselben Resultaten wie bei

---

1) Rood (moderne Farbenlehre, p. 192—194) mischte Pigmente auf dem Farbenkreisel mit Schwarz und erhielt für Gelb ebenfalls eine Aenderung nach Grün; auch er betont die Analogie der Aenderung von Spectral- und Pigmentfarben. Rood citirt hierbei die Beobachtungen von v. Bezold jedoch ganz unrichtig, indem bei v. Bezold homogenes Gelb durchaus nicht grün, sondern röthlich wird.

2) Anwendung des Spectralapparates. p. 11 u. 12. Tübingen 1873.

der Verdunkelung durch Rauchgläser; nämlich, dass bei Verminderung der Beleuchtung Orange, Gelb und Roth früher als Farben erkannt werden als Blau, und dass Gelb seinen Ton gegen Roth hin verändert, was scheinbar meiner Annahme widerspricht.

Ich habe die Versuche wiederholt und komme zu ähnlichen Resultaten. Die Versuche wurden angestellt im Dunkelzimmer, das eintretende Licht konnte durch ein verstellbares Diaphragma beliebig verringert werden.

Ferner waren in einem Rahmen Fäden senkrecht zueinander gespannt, in den Kreuzungspunkten wurden 2 cm grossen Quadrate der Helmholtz'schen Papiere angebracht; die gegenseitige Entfernung war ebenfalls 2 cm. Diese Anordnung ermöglichte es, das Verhalten einer und derselben Farbe auf weissem, grauem, schwarzem und farbigem Hintergrunde zu beobachten.

Was nun die verschiedene Erkennbarkeit der Pigmentfarben bei Verdunkelung betrifft, so wird diese sehr wesentlich von der Helligkeit und der Sättigung der verwendeten Pigmente abhängen.

So sehe ich Orange 4 noch farbig, wenn dies bei Ultramarin 1 nicht mehr der Fall ist, bei Ultramarin outremer 3, einem etwas helleren Blau, ist es gerade umgekehrt.

Reines Roth sehe ich stets schon schwarz, wenn Ultramarin mir noch farbig erscheint, natürlich nicht als Ultramarin, sondern als grauliches Grünblau. Das Roth, das Chodin früher farbig gesehen hat, wie Blau, nennt er Feuerroth und sagt davon, dass es lichtstark und gesättigt war. Es scheint dies ein sehr merkwürdiges Pigment zu sein, auch nach den Veränderungen zu schliessen, die es bei Verdunkelung durch Rauchgläser erleidet.

Es ist nach Chodin (p. 9, Tab. I_b) durch zehn Rauchgläser gesehen schwarz, durch acht schwarz mit röthlichem Schimmer, durch sechs dunkelroth, durch fünf roth, durch vier hellroth (!), durch drei feuerroth.

Auch Aubert sieht Roth früher als Blau, allein ich glaube, dass derartige Versuche über die frühere farbigere Erkennbarkeit der Pigmente nicht entscheidend sein können

für die Frage, ob Roth oder Blau durch Verdunkelung stärker geschwächt wird. Ich will hier auf einen Punkt aufmerksam machen, der zu grossen Täuschungen Anlass geben kann, nämlich auf die Abänderung der Helligkeitsdifferenzen der Pigmente untereinander bei Lichtabschwächung. Aubert¹⁾ stellt hierüber den Satz auf, dass Pigmente bei sehr verminderter Beleuchtung farblos erscheinen, aber sich durch grössere und geringere Helligkeit von ihrem Grunde unterscheiden. Er gibt auf schwarzem Grunde folgende Reihe an:

Roth am dunkelsten, dann folgen Orange und Dunkelgrün, Blau und Grau, Grün und Hellblau, Rosa und Gelb, zuletzt Weiss.

Ich habe mir nun die Uebergänge von Weiss durch Grau nach Schwarz in zehn Abstufungen auf Cartons hergestellt; indem ich dann dieselben als Unterlagen für die Pigmente in dem Rahmen benutzte, konnte leicht derjenige Carton ausfindig gemacht werden, der bei der Verdunkelung die gleiche Helligkeit wie Blau zeigte, und der sich auch in Bezug auf Farbe in gar keiner Weise von dem Blau unterschied, sodass das Vorhandensein des blauen Quadrates gar nicht bemerkt werden konnte.

Der Carton zeigte bei vollem Tageslicht ein weissliches Grau von ungleich grösserer Helligkeit als das verwendete Ultramarinblau.

Der Ausgleich des Helligkeitsunterschiedes zwischen dem Blau und dem weisslichen Grau erfolgt natürlich nicht in der Weise, dass das Blau so hell wird wie das Grau, sondern das Grau wird so dunkel wie das Blau. Eine einfache Betrachtung des Spectrums bei dieser Lichtstärke macht die Sache vollkommen verständlich. Das Spectrum ist an seinem rothen und violetten Ende verkürzt. Das Grau hat nun die Einbusse der beiden Enden zu ertragen, das Blau blos die des violetten Endes, da das Pigment das Roth von Anfang an absorbiert. Das Blau wird also langsamer dunkler werden, und zugleich wird durch den Verlust der violetten Strahlen sein Farbenton nach Grün hin verschoben werden.²⁾ Hier-

1) Aubert, Grundzüge der phys. Optik. p. 532.

2) Es steht dies gar nicht in Widerspruch mit den p. 148 von mir

durch wird nicht blos die Helligkeitsempfindung eine gleiche, sondern auch die Farbenempfindung, und zwar in der Weise, dass das Grau grünlichblau¹⁾ wird, nicht das Blau grau.

Wir sind aber mehr geneigt, wenn das Blau vom Grunde nicht mehr unterschieden werden kann, zu sagen, das Blau sei dem Grunde gleich geworden, und da derselbe bei grösserer Lichtstärke in uns eine farblose Empfindung erregt hat, so nennen wir das Blau bei so geringer Intensität dann farblos. Roth dagegen kann, da es blos aus Strahlen von *A* bis *D* besteht, nur schwarz oder farbig in seinem ursprünglichen Tone sein. Es kann nun der Fall eintreten, dass zwei Farben bei einem gewissen Grade der Lichtabschwächung in unserem Auge noch eine Empfindung der Farbe hervorrufen, wir aber die Blauempfindung nicht mehr als Farbenempfindung gelten lassen wollen, weil Weiss oder Weissgrau bei derselben Verdunkelung die gleiche Empfindung in uns erregt.

Was die Tonänderungen der Pigmentfarben bei Verdunkelung betrifft, so möchte ich darauf aufmerksam machen, dass man nach längerem Aufenthalte im Dunkelmzimmer andere Aenderungen erhält, als wenn man, eben vom stärkeren Lichte kommend, in das Dunkelmzimmer getreten ist. Es beruht dies darauf, dass wir Farben wesentlich anders empfinden, wenn wir vorher auf schwarzen Grund, als wenn wir auf weissen geblickt haben. (Hierbei sind nicht die Aenderungen gemeint, die dadurch hervorgerufen werden, dass dem ausgeruhten Auge alles heller erscheint.) Der Unterschied ist ständig der, dass mit dem gebrauchten Auge

---

angegebenen Veränderungen des Kupferoxydammoniaks, indem dort viel geringere Grade der Verdunkelung in Anwendung kamen. Auch blaue Medien erscheinen bei sehr grosser Verdunkelung und langer Adaption grünlichblau.

1) Bei einer Intensität des Lichtes, bei der das Spectrum an seinen Enden verkürzt ist, kann ein weisses Papier nicht einfach grau erscheinen, sondern die Einbusse der rothen und violetten Strahlen muss sich, da dieselben einander nicht complementär sind, in der Weise bemerkbar machen, dass ein Körper, der auch alle Strahlen gleichmässig reflectirt, bei dieser Intensität farbig erscheint. Die Resultante der noch wirksamen Strahlen ist ein lichtschwaches Grünlichblau. (Mondbeleuchtung).

mehr Roth gesehen wird als mit dem geschonten. Die Ursache hierfür scheint mir in dem farbigen Abklingen des Nachbildes eines weissen Objectes zu liegen, wobei, wie schon Helmholtz¹⁾ erwähnt, namentlich die rosenrothe Phase hervortritt.

Nach 5—10 Secunden langer einäugiger Fixation einer weissen Fläche ergeben sich für mich zwischen geschontem und gebrauchtem Auge folgende Unterschiede:

Bezeichnung des Pigmentes	Geschontes Auge	Gebrauchtes Auge
Cochenilleroth 1	stumpf, schmutzig	feurig, gesättigt
Carmin 3	fahl	feurig
Orange 4	blass (mehr gelblich)	mehr röthlich
Gelb 4	grünlichgelb	röthlichgelb
Grün 2	grün	gelblichgrün
Grün 1	gesättigtgrün	etwas verblasst
Ultramarin outremer 3	grünlich	wärmer
Ultramarin 1	wie Ultramarin 3	viel mehr violett
Neuviolett 7	viel mehr blau	mehr purpurn

Es ist zu bemerken, dass, je stärker die Beleuchtung des weissen Papiers ist, desto kleiner die Zeit der Fixation sein muss; bei directer Sonnenbeleuchtung genügt beinahe eine momentane Betrachtung. Wird die Betrachtung zu lange fortgesetzt, so tritt ein Zustand der Ermüdung ein, in dem die Farben wieder in anderer Weise verändert erscheinen. Ferner darf die Schonung des Auges nicht durch einfaches Schliessen des Lides bewerkstelligt werden, indem sich sonst das grüne Nachbild des durch das Lid gegangenen rothen Lichtes einmischt, das Auge muss ohne jeden Druck vollkommen lichtdicht verschlossen werden. Namentlich ist darauf zu achten, dass die Verbindungslinie der beiden Augen senkrecht zur Richtung der die Papiere erhellenden Lichtstrahlen ist, es ist dies nöthig wegen der Erscheinungen, die bei Fechner's seitlichem Fenster Versuch auftreten.

1) Helmholtz, Phys. Optik. p. 367—375.

Die beschriebenen Unterschiede zwischen dem geschonten und gebrauchten Auge sind, wie dies bei allen Nachbildern der Fall ist, in der Frühe am besten wahrnehmbar; sie sind durchaus nicht individueller Natur, sondern wurden mir von jedermann bestätigt. Hr. Prof. v. Bezold, dem ich die Versuche zeigte, war erstaunt über die Deutlichkeit der Veränderungen.

Die Unterschiede sind grösser bei den dunklen Farben Violett, Blau und Roth als bei dem hellen Gelb; wird das Gelb verdunkelt, so treten sie auch bei diesem in sehr frappanter Weise auf. Es scheint mir dies eine Bestätigung dafür zu sein, dass wir es hier mit einer bestimmten Phase eines positiven Nachbildes zu thun haben, denn das Nachbild wird um so intensiver sein, je geringer das reagirende Licht ist.

Welch geringen Werth die Beobachtung der Tonänderungen von Farben bei Verdunkelung ohne Kenntniss dieser Erscheinungen hat, wird aus folgendem Versuch hervorgehen.

Nach einem viertelstündigen Aufenthalt im Dunkelzimmer sah ich mit dem einen Auge durch eine Oeffnung 20 Sekunden nach einem diffus beleuchteten weissen Carton, das andere Auge blieb sorgfältig verschlossen. Hierauf blickte ich mit dem dem Licht ausgesetzt gewesenen Auge auf einen grösseren Bogen des Gelb 4, dasselbe erschien mir bei vollständig geöffnetem Diaphragma rein gelb, ging aber dann bei allmählicher Abschwächung des Lichtes durch Orange in ein derbes Rothbraun über. Bei dem gleichen Grade der Lichtabschwächung erschien dasselbe Gelb dem bisher geschont gewesenen Auge blassgrün, welcher Ton bei Verstärkung des Lichtes durch Gelbgrün in Gelb überging.

Es ergibt sich hieraus eine Vorsichtsmaassregel, die bei Untersuchungen über die Veränderungen des Farbentones durch Verdunkelung nicht ausser acht gelassen werden darf, es ist nämlich ein ganz bestimmter Modus des Ausruhens nöthig; derselbe besteht entweder in der Schliessung der Augen oder besser in der ungezwungenen Betrachtung einer grösseren schwarzen Sammtfläche.

In der Vernachlässigung dieser Vorsichtsmaassregel sowie

in der Anwendung von Rauchgläsern behufs Lichtabschwächung ist wohl die Ursache der Verschiedenheit der Beobachtungen von Chodin und mir zu suchen. Ausserdem hat Chodin übersehen, dass im dispersiven Spectrum die Brechungsexponenten nicht proportional den Wellenlängen wachsen; dies hatte eine verschiedene Interpretation gleicher Beobachtungen zur Folge.

Die von mir erhaltenen Resultate lassen sich folgendermassen zusammenfassen:

„Die Analogie der Aenderungen von Spectralfarben und Pigmentfarben ist keine vollständige. Aus der Aenderung einer homogenen Farbe kann gar kein Schluss auf die Aenderung des entsprechenden Pigmentes gemacht werden, sondern dessen Aenderung ist die Resultante aus den Aenderungen der das Pigment componirenden homogenen Farben.

Das gesammte Verhalten der homogenen Farben bei Lichtabschwächung erklärt sich aus der Young-Helmholtz'schen Theorie durch die Annahme:

Einer Verringerung der Intensität verschiedenfarbigen Lichtes entspricht eine verschieden grosse Verminderung der Empfindungsstärke in der Weise, dass dieselbe für Strahlen kleinerer Wellenlänge, gleichviel welchem Theile des Spectrums sie angehören, langsamer abnimmt als für Strahlen grösserer Wellenlänge.“

Ich glaube, dass es als eine neue Gewähr für die Richtigkeit der Young-Helmholtz'schen Theorie dreier Grundempfindungen betrachtet werden muss, dass sie für eine solche Summe der verschiedenartigsten Erscheinungen durch eine Verallgemeinerung eine Erklärung gibt.

Fig. 8. $\frac{1}{4}$ nat. Gr.

Fig. 10. $\frac{1}{8}$ nat. Gr.

Fig. 6. $\frac{1}{4}$ nat. Gr.

Fig. 9. $\frac{1}{8}$ nat. Gr.

Ketteler Fig. 1-2. Albert Fig. 3-17.

Fig. 5.

Fig. 7. $\frac{1}{4}$ nat. Gr.